نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی

سال نهم، شمارة چهارم/ زمستان ۱۳۹۸/ صفحه ۲۴_۲۳

تحلیل و شبیهسازی موتور سوئیچ رلوکتانس شارمحور با استاتور تغییر ساختاریافته در حالت استاتیکی و دینامیکی

محمدجواد جليليان'، حسين تركمن **، محسن حمزه *

^۱ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران mohammadjavadjalilian1994@gmail.com ^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران h_torkaman@sbu.ac.ir ^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران m_hamzeh@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، ساختار جدیدی از موتورهای سوئیچ رلوکتانس شارمحور بهبود داده شده است. در این نوع موتورها، ترکیبات مختلف تعداد قطب های روتور و استاتور روی گشتاور موتور و عملکرد آن تأثیر خواهد گذاشت. در این راستا با تغییر در ساختار استاتور موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمحور، نتایج بهتری برای گشتاور و شار مغناطیسی به دست خواهد آمد. ساختار بهبود یافته دارای مزایای مسیر کوتاه شار و بخش بخش کردن روتور برای بهبود چگالی شار است. در ادامه، مشخصات اصلی هندسی، الکتریکی و فیزیکی موتور ارائه شده است. سپس ساختار پیشنهادی با استفاده از تعداد بیشتری از بخشهای روتور توسط ماژولهای استاتور تغییریافته اصلاح میشود. ساختار بهبود یافته دارای پتانسیل بالایی برای وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EVs) و وسایل نقلیهٔ الکتریکی هیبریدی (HEVs) است. نتایج به دستآمده نشان میدهد که موتور پیشنهادشده و اصلاح شده در مقایسه با موتور مرجع و گشتاور مشابه کمتر از جرم مواد فعال استفاده میکند. مقایسهٔ عملکرد موتورهای انتخاب شده با استفاده از تجزیه و تحلیل سهبعدی روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

^{*} نويسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

از آنجا که هر دوی روتور و استاتور قطبهای برجسته دارند، موتور سوئیچ رلوکتانسی بسیار متفاوت از سایر ماشینهای چند فاز است. این موتور را میتوان فقط به همراه مبدل قدرت مخصوص و کنترلشده استفاده کرد، در نتیجه تنها مشخصات کلی آنها مناسب است. موتور SR از طریق کشش آهنربایی گشتاوری ایجاد میکند که بین آهانرباهای مغناطیسی استاتور و مجموعه قطبهای برجسته اتفاق میافتد و روی یک روتور ساده شکل میگیرد که از جنس مواد فرومغناطیسی ساخته میشود [1-۴].

اصول سادهٔ تولید گشتاور بهصورت شهودی به شکل بسیار سادهای با موتور رلوکتانسی مشاهده میشود (شکل ۱).



شکل (۱): موتور شار شعاعی سوئیچ رلوکتانس سهفاز ۱۲/۸

اگر جریان وارد سیمپیچ شود، روتور تا نقطهای که همسو با کویلها شود خواهد چرخید؛ در این نقطه رلوکتانس فاصلهٔ هوایی مینیمم و در نتیجه اندوکتانس فاز ماکزیمم است. اگر ماشین بهطور آهسته و بهصورت معناطیسی بارگذاری شود و سطح متوسط گشتاور تولید شود، فولادی که روتور و استاتور از آن ساخته شده است بهطور مغناطیسی در مد تقریباً خطی رفتار خواهد کرد؛ یعنی برای تعداد مشخصی از دورهای سیمپیچ، شار مغناطیسی فاز تقریباً متناسب با جریان فاز تغییر میکند. جریانهای فازی همیشه بهصورت سنکرون با موقعیت مکانیکی روتور تغییر میکند. در سرعتهای کم، فازها در تمام منطقهٔ اندوکتانس افزایشی برقدار میشوند و محدودسازی جریان اکتیو توسط کترلکننده انجام میشود. گشتاور با تنظیم دامنهٔ جریان فاز کنترل میشود.

از دیـدگاه شـار، موتورهای سـوئیچ رلوکتانسـی بـه انـواع شـعاعی و شارمحوری تقسیم می شوند. تفاوت نوع شارمحور بهنـوع شار شـعاعی را میتوان در نسبت گشتاور به حجم بالا، بهرهٔ بالا، فاصلهٔ هوایی قابل تنظیم، نیروی جاذبهٔ متعادل بین استاتور و رتور و تبادل گرمایی بهتر بیان کـرد [۵ و ۶]. موتورهای شارمحور میتوانند یکطرفه یا دوطرفه، با هسته یا بـدون هسته، دارای روتور داخلی یا خارجی و یا دارای آهـنربای سطحی یا

داخلی باشند [۷]. گشتاور ضربانی این موتورها از نوع مرسوم، بیشتر است اما کماکان چگالی گشتاور بالایی دارند. در این راستا مطالعات جامعی روی موتورهای شار شعاعی انجام شده است. مطالعات صورت گرفته منجر به تلاشهایی برای تغییر ساختار این نوع موتورها بوده که برخی از آنها عبارتاند از:

- انواع ترکیبات تعداد قطبهای استاتور و روتور؛
- ایجاد کردن دو برجستگی در هر قطب استاتور یا روتور؛
 - تغییر شکل و اندازهٔ قطب استاتور یا روتور؛
 - استاتور با قطبهای نامتقارن؛
 - تغيير فاصلة هوايي از طريق قوس الكتريكي قطب؛

 معرفی موتور با استاتور دوجداره و موتورهای چندلایه.
 استفاده از ساختار بخش روتور یکی از اصلاحات مهم در ساختار موتورهای سوئیچ رلوکتانس بوده است که این موتورها را قادر ساخته در هر نسبت حجمی، گشتاور قابل ملاحظهای را تولید کنند [۸ ۹ و ۱۰]. در این راستا در [۹]، دو ساختار مختلف برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس بخش روتور شار شعاعی معرفی و آنها را به صورت زیر نام گذاری کردند:

الف. موتور سوئیچ رلوکتانسی تکدندانهای با روتور تکهای و موتور سوئیچ رلوکتانسی چنددندانهای با روتور تکهای آ. این دو موتور برای سهولت نام گذاری به صورت اختصاری به نامهای STW و MTW نام گذاری شدهاند. با توجه به اینکه این دو موتور از لحاظ ساختاری کاملاً متفاوتاند، عملکرد یکسانی دارند. با توجه به ساختار این دو نوع موتور میتوان پی برد که موتور MTW به پایان سیم پیچی طولانی تری نسبت به موتور STW نیاز دارد. از آنجا که موتورهای شارمحوری نسبت به موتورهای شار شعاعی به پایان سیم پیچی بلندتری نیاز دارند، موتورهای MTW شارمحور طول پایان سیم پیچی بلندتری خواهند داشت.

بنابراین موتور STW بهعنوان موتور مرجع برای در نظر گرفتن طراحی و مقایسه در این مقاله انتخاب شده است. این ساختارها کاملاً برای کاربردهای ترکشن و نیرو محرکه مانند هابموتورها مورد تقاضاست؛ زیرا محدودیتهای فضایی منجر به بزرگ شدن قطر موتور و کاهش طول پشتهٔ موتور یا همان Stack شود. برای کاربردهای ترکشن، موتورهای SRM دارای مزیتهایی از جمله از نظر هزینهای به نسبت موتورهای آهنربای دائم بدون جاروبک و موتورهای القایی دارد. علاوه بر این، موتورهای SRM دارای چگالی گشتاور زیادی نیز هستند [۱۱ و ۱۲].

به تازگی نشان داده شده که موتورهای سوئیچ رلوکتانسی که تعداد قطبهای روتور بیشتر از تعداد قطبهای استاتور آن است، راندمان و گشتاور بیشتری به نسبت جرم آنها دارند [۱۳ و ۱۴]. ترکیبات مختلف

^{1.} Single-Tooth Winding Segmental Rotor SRM

^{2.} Multi-Tooth Winding Segmental Rotor SRM

۱۶ نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی

تعداد روتور و استاتور بر روی گشتاور موتور و عملکرد آن تـ أثیر خواهـد گذاشت. نتایج آزمایشها نشان میدهد که موتور بهینهسازیشده بـا تعـداد استاتور و روتور ۱۲ به ۱۴ دارای بیشترین نیوتن متر بر کیلوگرم در مقایسـه با سایر موتورهای مشابه بوده است [۹].

جدول (۱): علامت اختصاری پارامترها		
علامت اختصاري	پارامتر	
N _{ph}	تعداد دور فازها	
N _C	تعداد کویل در هر فاز	
Х	یک عدد صحیح مثبت	
N _{seg,sttr}	تعداد بخشهای استاتور	
N _{seg,rtr}	تعداد بخشهای روتور	
La	اندوكتانس خودي هر فاز در موقعيت همراستا	
L _u	اندوکتانس خودی هر فاز در موقعیت غیر همراستا	
3	زاويهٔ حرکت	
A _{ovl}	ناحیهٔ همپوشانی بین بخشهای روتور و استاتور	
B_{g}	چگالی شار متوسط فاصلهٔ هوایی در موقعیت همراستا	
W_{f}	انرژی ذخیرهشده در میدان	
T _{avg}	گشتاور متوسط	
I_{ph}	جريان فاز	
T _{inst}	گشتاور لحظهای	
φ _a	شار فاز در حالت همراستا	
φ _u	شار فاز در حالت غیر همراستا	
Lg	طول فاصلهٔ هوایی	
L _{act}	طول فعال هسته	
D_{avg}	قطر متوسط هسته	
ΔL	اختلاف اندوكتانس	
Do	قطر بيروني	
Di	قطر داخلی	
SOP	ضريب كف شكاف	
RPP	گام قطب رو تور	
RPA	قوس قطب روتور	

در این مقاله، یک مدل ۳ فاز، به همراه جزئیات کامل بخشهای روتور، استاتور مدولار موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری ارائه شده است. برای آنالیز کردن موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری ارائه شده بهره گرفته شده است. برای آنالیز استاتیک و تحلیل گذرا میتوان از مدل سهبعدی استفاده کرد. برای گام بعدی، ساختار پیشنهادی با افزایش تعداد بخشهای روتور به نسبت تعداد ماژولهای استاتور اصلاح شده و همچنین شکل نوک باریک ماژول استاتور نیز اصلاح شده است. اصلاح و دادن اشباعهای محلی در نوک باریک ماژول استاتور صورت گرفته است. علاوه بر این، این ساختار جدید منجر به کاهش قابل توجه وزن آهن هسته بهویژه در استاتور میشود؛ زیرا بخش عمدهای از تلفات آهنی در این قسمت آشکار خواهد شد. این کار گشتاور خروجی موتور را که یکی

از مهمترین معیارهای عملکرد موتور است، خراب نخواها کرد یا بهعبارت دیگر باعث بدتر شدن گشتاور نخواهد شد.

۲. موتور سوئيچ رلوكتانس شارمحوري

۱.۲. جزئیات هندسی

یک سیستم الکترومکانیکی با مسیر شار کوتاه و همچنین دارای ضریب استفادهٔ بهتر از فضای موجود بهصورت شکل (۲) آورده شده است.



قسمتهای بالا و پایین که در شکل نشان داده شدهاند، بهعنوان قسمتهای متحرک در نظر گرفته شده و همچنین فرض می شود که سیم پیچی و بازوهای عمودی هسته که در شکل مشخص است، بهصورت ثابت خواهند بود. مدل سه بعدی موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری با تکرار هریک از قسمتهای متحرک و ثابت به تعداد مورد نظر به دست خواهد آمد. نمای دوار موتور در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده که در آنها، ۱/۴ استاتور و روتور مشخص شده است.



قسمتهای مختلف شماره *گ*ذاریشده در شکل (۳) بـ مترتیـب نشانگر موارد زیر هستند.

شمارهٔ ۱، ۲و ۳ بترتیب ماژول روتور؛ آهنربا، پوشش روتور.
 این موتور بهعنوان یک موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری در نظر گرفته می شود. مسیر شار که در شکلهای (۳) و (۴) نشان داده شده است، هر دو حالت قرارگیری روتور به صورت همراستا و غیر همراستا را نشان می دهد. همان گونه که ذکر شد، مسیر شار تا جایی که ممکن بوده کوتاه شده است و استاتور شارهای موجود را تا جای ممکن از خود عبور می دهد؛ در نتیجه تلفات هسته پایین خواهد آمد.
 پارامترهای ژلوره شده است.

جدول (۲): تعریف پارامترهای هندسی موتور شکل (۲)			
پارامتر	نشانه	مقدار	
Stator Pole Pitch	SPP	۳۶۰/Ns	
Rotor Pole Pitch	RPP	۳۶۰/Nr	
Rotor Pole Arc	RPA	C*RPP	
Stator Wide Pole Arc	SPA_W	C*RPP	
Stator Narrow Pole Arc	SPA_N	2*(SPP- RPP)+SPA_W	
Slot Opening	SOP	RPP*(1-C)	
Stator Wide Pole Width	SPW_W	از طراحی	
Stator Narrow Pole Width	SPW_N	از طراحي	
Length of Air-gap	L_AG	از طراحي	
Width of Stator Pole Tip	W_SPT	از طراحي	
Length of Stator Pole Base Part	L_SBP	از طراحي	

فرمولهای ارائه شده را می توان به راحتی از روی شکل نیز استخراج کرد. پارامتر C به صورت ضریب کف شکاف تعریف می شود و نسبت قوس قطب رو تور به گام قطب رو تور را اندازه می گیرد. استاتور و رو تور به بخشهای مختلف تقسیم شده اند و برای بسته شدن مسیر شار به آهن نیازی ندارند. در واقع، ماژول استاتور روی یک شفت کاربردی خاص نصب شده است. نواحی اتصال برای ماژول استاتور، دو سطح از ماژول شعاعی داخلی است که ورقه ورقه شده است. بخشهای رو تور به وسیلهٔ دیسک جامد با مواد غیر مغناطیسی پوشیده شده است. دو رو تور به صورت یک محفظهٔ بسته به دور استاتور به یکدیگر متصل اند. استاتور روی یک شفت ثابت تو خالی محکم شده است که پایانه های سیم پیچهای مورد نیاز را می توان از این طریق به دست آورد.

ترکیب معتبـری از تعـداد مـاژول اسـتاتور و بخـشهـای روتـور بهصورت زیر ارائه میشود:

$$N_{\text{seg.sttr}} = N_{\text{ph}} X N_{\text{c}}$$

$$N_{\text{seg.rtr}} = (N_{\text{ph}} X \pm 1) N_{\text{c}}$$
(1)

برخی از ترکیباتی که قابلیت ساخته شدن دارند عبارتاند از: ۱۲/۱۰، ۱۲/۱۴، ۱۸/۱۵، ۱۸/۲۱ [۱۵]. در این مقاله، موتور ۱۲/۱۴ برای مقایسه با موتور مرجع STW انتخاب شده است. تصمیم گیری دربارهٔ ترکیبات مناسب برای موتور به عملکردی که برای ماشین تعریف شده، وابسته است.

۲.۲. معادلات گشتاور خروجی

روش استخراج گشتاور خروجی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری در [۱۶] و [۱۷] ارائه شده است. روشهای مشابه را نیز میتوان برای موتور مورد نظر مورد استفاده قرار داد. گشتاور متوسط گسترش یافته بهوسیلهٔ موتورهای غیراشباع بهصورت زیر بیان میشود:

$$T_{avg} = \frac{1}{2}I_{ph}^2 \frac{\Delta L}{\epsilon} = \frac{1}{2}I_{ph}^2 \frac{(L_a - L_u)}{\epsilon}$$
(7)

معادلهٔ گشتاور عبارت است از:

$$\epsilon^* T_{avg} = \frac{1}{2} I_{ph}^2 L_a k \tag{(7)}$$

که در رابطهٔ بالا k بهصورت (l-Lu)/La)است. برای موتور مـورد نظـر نیز La بهصورت زیر تعریف می شود:

$$L_a = \frac{4B_g A_{ovl} N_{ph}}{I_{ph}}$$
(*)

گشتاور متوسط را میتوان بهصورت زیر معرفی کرد:

$$T_{avg} = \frac{1}{4} I_{ph} N_{ph} B_g K (D_o^2 - D_i^2)$$
(۵)

L_{act} = (D_o-D_i) قطر متوسط و D_{avg} = (D₀+D_i)/2 در این رابطه، 2/D_{avg} = (D₀+D_i)/2 قطر معال هستهاند. گشتاور متوسط موتور مورد نظر بـهصـورت زیـر حاصل میشود:

$$T_{avg} = \frac{1}{2} I_{ph} N_{ph} B_g K D_{avg} L_{act}$$
(\$)

$$B_{g} = \frac{N_{ph}I_{ph}\mu_{0}}{8I_{g}}$$
(Y)

۳.۲. بهسازی و اصلاح ساختار موتور

همان طور که در بخشهای قبل ذکر شد، تعداد بخشهای روتور از تعداد قطبهای استاتور بیشتر است که میتواند ظرفیت گشتاور تولیدی موتور را بهبود بخشد. برای این بخش ترکیب ۱۴/۱۲ انتخاب شده است. برای موتور پیشنهادشده، پهنای استاتور و کمان قطب

۱۸ نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی

باریک مشابه مشخصات موتور STW انتخاب شده است [۱۹]. این کار باعث می شود که مقایسهٔ عملکرد دو موتور فقط به توپولوژی آنها وابسته شود؛ زیرا تأثیر این پارامترهای هندسی از بین رفته است. این پارامترها به ضریب C (ضریب کف شکاف) وابسته است. ضریب روی گشتاور خروجی، بهعنوان عملکرد اصلی موتور بررسی شود.

گشتاور لحظـهای هریـک از فازهـای موتـور سـوئیچ رلوکتانسـی بهصورت زیر بیان میشود:

$$T_{\text{inst}} = N_{\text{ph}} I_{\text{pk}} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{\partial W_{\text{f}}}{\partial \theta}$$
(A)

تأثیر بخش دوم معادله بهدلیل اینکه اشباع عمیق در موتور سوئیچ رلوکتانس نادیده گرفته شده، کوچک است. بنابراین گشـتاور متوسط موتور در طول یک حرکت بهصورت زیر بیان میشود:

$$T_{avg} = \frac{1}{\varepsilon} N_{ph} I_{pk} \varphi_a \left(1 - \frac{\varphi_u}{\varphi_a}\right)$$
(4)

$$\varphi_a = B_g A_{ovl} \tag{1.}$$

که Aovl سطح همپوشانی بخش روتـور و مـاژول اسـتاتور در حالـت همراستایی است. این سطح همپوشانی میتوان را بهصورت زیـر بیـان کرد:

$$A_{ovl} = (\frac{D_o - D_i}{2})(\frac{D_o + D_i}{4})(\frac{RPA - SOP}{2})$$
 (11)

اگر ضریب C=RPA/SOP در معادله جایگزین شود، فرمول زیـر حاصل خواهد شد.

$$A_{ovl} = (\frac{D_o^2 - D_i^2}{16})(2C - 1)RPP$$
 (17)

با توجه به جایگذاری صورتگرفته در نهایت میتوان معادلهٔ گشتاور متوسط را بهصورت زیر نیز بیان کرد.

$$T_{avg} = N_{ph}I_{pk}B_{g}(\frac{D_{o}^{2} - D_{i}^{2}}{16})(2C - 1)(1 - \frac{\phi_{u}}{\phi_{a}})$$
(17)

این معادله نشان میدهد که گشتاور متوسط موتور با افزایش ضریب C بیشتر خواهد شد. شایان ذکر است که په پ یک تابع غیرخطی از ضریب C است. بنابراین برای تعیین کردن تغییرات گشتاور که تابعی از ضریب C است، باید از روش FEA بهره گرفته شود. کاملاً منطقی است برای آنکه تأثیرات ضریب C روی مقایسهٔ موتورهای مورد نظر از بین برود، ضریب یکسانی را برای آنها در نظر بگیریم. ضریب C برای موتور STW که موتور مرجع است، برابر ۱۲/۱۴ مقدار ضریب C، ۲۸۷۰ در نظر گرفته شده بود.

می توان مشاهده کرد که ماژول های باریک استاتور دارای قوس پهن تری هستند که باعث ایجاد زاویهٔ نوک قطب بسیار تیزی خواهد شد که در آن مسیر شار تنگ تر باعث افزایش رلوکتانس در حالتهای مختلف روتور می شود. در نتیجه گشتاور کمتری برای MMf فازها به دست خواهد آمد. بنابراین نیاز است که برای فراهم کردن یک مسیر شار با پهنای مناسب، شکل تیز قطبهای باریک اصلاح شود. با این کار از اشباعهای عمیق محلی جلوگیری به عمل می آید. در این راستا، ارتفاع نوک قطب باید با پهنای قطب باریک استاتور اولین لایه از صفحهٔ محاسبه شده که در شعاع داخلی موتور است، برابر باشد که با

پهنای ماژول استاتور و طول محوری موتور به روشی انتخاب میشود که فضا برای کویلها در هر سه موتور بدون تغییر نگه داشته شود و چگالی شار قسمتهای مختلف هسته مقدار معقولی باشد. سپس تعداد دور کویل هر فاز طراحی میشود، بهطوری که مقاومت فاز برای هر سه موتور بهصورت یکسانی به دست بیاید. در واقع مقایسه بر اساس تلفات مسی یکسان بین هر سه موتور صورت خواهد گرفت.

ساختار موتور STW همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده، هستههای استاتور و روتور به شکل فولاد چندلایه دارد و دندانههای استاتور به دو بخش تقسیم شده است که دو برابر عرض دندانههای تحریک هستند و برای اتصال مسیر شار مدار استفاده می شوند. همچنین بخش روتور از یک سری قطعهها ساخته شده که داخل بدنهٔ آنها آلومینیوم تعبیه شده است. شکل (۵) مدل سه بعدی موتور STW را نشان می دهد.



جدول (۳) جزئیات هندسی و الکتریکی هر سه موتور را نشان میدهد. مدل دوبعدی خطی شدهٔ اصلاح شده در نتایج شبیه سازی ها آورده شده است. گفتنی است که موتور هدف و موتور اصلاح شدهٔ هدف به صورت یک ارزیابی اولیه در این مقاله قرار گرفته اند و در حالت بهینه قرار ندارند.

جدول (۳): مقایسهٔ پارامترهای هندسی و مشخصات الکتریکی سه موتور			
پارامترها	موتور STW	مو تور پیشنهادشده	موتور پیشنهادی اصلاحشدہ
تعداد قطب استاتور/ ماژول	١٢	١٢	١٢
تعداد قطعات روتور	۱.	۱.	14
تعداد فازها	٣	٣	٣
قطر بیرونی ورقه (D _o (mm	10.	218/2	718/7
طول محوري مادهٔ فعال (L (mm	10.	۶۳/۸	23/1
طول فاصلهٔ هوایی (mm)	۰/۳	• /٣	۰/٣
قطر حفرہ/ متوسط قطر ہوا (mm)	٩٠/٨	۱۷۰/۶	۱۷۰/۶
گام قوس ماژول پهن استاتور (.deg)	۳۰/۵	٣٠/۵	۸/۲۲
گام قوس ماژول باریک استاتور (.deg)	۱۸/۵	۱۸/۵	۳۰/۴
گام قطعه رتور (deg)	۳۰/۵	٣•/۵	۲۱/۸
تعداد چرخش در هر فاز	۲۷۰	547	547
مقاومت فاز $(\Omega) \ au^{0}$ ۲۰	۲/۵۶	۲/۵۷	7/07
ضريب كف شكاف (٪)	41	41	41
تخمين طول چرخش (mm)	480	714	714
پایان سیمپیچی در هر دور چرخش (mm)	180	۱۲۳	١٢٣
قطر سیم مؤثر (mm)	١	١	١
(mm ³) D ₀ ² * L موتور	37/17V2 e.8	7/918 e.8	7/010 e+9
جنس ھسته	М۳۵-۲۷۰	Μ۳۵-τνι	Μ۳۵-τνι

۴.۲. نتایج شبیهسازی

از نقطهنظر شبیهسازی سهبعدی، موتور سوئیچ رلوکتانس را میتوان ترکیبی از چند ماشین خطی در نظر گرفت. عملکرد کلی ماشین از مجموع عملکردهای ماشینهای خطی منحصربهفرد حاصل میشود. بر اساس پروسهٔ معرفیشده در مرجع [۲۰] مدل سهبعدی موتور پشنهادی در پنج سطح محاسبات مدل شده و بر اساس همین روش که در مرجع نیز وجود دارد، شبیهسازی نیز شده است.

نمای سهبعدی طرحهای سایهدار چگالی شار مغناطیسی در وسط روتور در شکل (۶) نمایش داده شده است. در شکل (۵) فقط مواد اکتیو بخشهای موتور نشان داده شده است.

مدل سهبعدی موتور مورد نظر اصلاحشده بر اساس توضیحات بخشهای قبل به دست میآید. میتوان توزیع شار مغناطیسی برای لایهٔ میانی با روش سهبعدی را برای دو حالت همراستا و غیر همراستا مورد بررسی قرار داد. در واقع میتوان بیان کرد که اصلاح نوک قطبهای باریک استاتور باعث شده که مسیر بدون تغییر پهنا برای شار مغناطیسی فراهم شود.



در جدول (۴) می توان مقادیر وزن و گشتاوری را مشاهده کرد که موتورها در حالتی که ۳۰۰ وات تلفات مسی دارند. سایر پارامترهای دیگر نیز برای این سه موتور با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول (۴): مقایسهٔ وزن و گشتاور هر سه موتور			
موتور پیشنهادی اصلاحشدہ	مو تور پیشنهادشده	موتور STW	پارامترها
٣/۴٣	۴/۳۷	٩/٢٣	جرم أهن استاتور (kg)
١/٧٩	۲/۲۶	۲/۴۶	جرم آهن روتور (kg)
۵/۲۲	۶/۶۳	11/89	کل جرم آهن (kg)
۲/۱۶	۲/۱۶	۲/۱۶	جرم مس (kg)
٧/٣٨	٨/٧٩	۱۳/۸۵	مجموع جرم فعال (kg)
79/1	26/28	79/0	میانگین گشتاور (Nm) تلفات مس 300W
۳/۵۵	٢/٩٩	١/٩١	گشتاور در واحد جرم فعال (Nm/kg)

۳. الگوریتم شبیهسازی ۹.۱. پارامترهای هندسی اصلاحشده

با توجه به تغییری که در ساختار استاتور موتور انجام شده است، برخی پارامترهای آن نیز دچار تغییر و اصلاح شدهاند. ایـن موتور همانند موتور اصلی بهصورت ۱۲/۱۴ است و بهجای استفاده از یک کویل با تعداد ۵۴۸ دور سیمپیچ از دو کویل با تعداد ۲۷۴ دور سیمپیچ استفاده شده که یکی از این دو کویل در قسمت بالای یوغ استاتور و دیگری در قسمت پایین یوغ قرار گرفته است.

۲۰ نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی



همان طور که در جدول (۵) نیز مشخص است، پهنای یوغی که بـرای استاتور استفاده شده، برابر با پهنای بخش پهـن اسـتاتور (۱۹/۶ میلـیمتـر) است. باید توجه داشت که با توجه به تغییراتی که در موتور به وجود آمـد و یوغ اضافه شد، در سایر پارامترها نیز تغییراتی صورت گرفته است.

پارامتر	نشانه	مقدار
Stator Pole Pitch	SPP	۴۴/۷ mm
Rotor Pole Pitch	RPP	۴۹/۶ mm
Rotor Pole Arc	RPA	۳۲/۴ mm
Stator Wide Pole Arc	SPA_W	۳۲/۴ mm
Stator Narrow Pole Arc	SPA_N	۴۵/۴ mm
Slot Opening	SOP	۵/۹ mm
Stator Wide Pole Width	SPW_W	۱۹/۲ mm
Stator Narrow Pole Width	SPW_N	۹/۸ mm
Length of Air-gap	L_AG	۰/۳ mm
Width of Stator Pole Tip	W_SPT	۷/۲ mm
Length of Stator Pole Base Part	L_SBP	۴۴ mm

جدول (۵): پارامترهای هندسی مورد نظر با اصلاحات صورتگرفته

۱.۳. روند شبیهسازی و تحلیل نتایج

ابتدای امر برای انجام شبیه سازی در نرمافزار نیاز به ترسیم پارامترهای هندسی موتور می باشد؛ به همین دلیل موتور را در راستای افقی به دو قسمت تقسیم کرده تا ترسیم آن ساده تر شود. ابتدا یکی از بخش های موتور ترسیم شده و با استفاده از دستورات Mirror و pattern pattern کامل شده است.



شکل (۸): ترسیم یکی از بخشهای موتور و استفاده از Mirror برای کامل کردن آن



ترسیم استاتور در شکل (۹) نشان داده شده و پس از آن نیاز است که قسمتهای دیگر نیز بهترتیب ترسیم شوند تا شبیهسازی دوبعدی موتور مورد نظر به دست بیاید. در مرحلهٔ دوم، ترسیم موتور پارامترهای مورد نیاز روتور از جدول (۵) استخراج شده و در نرمافزار ترسیم گردیده است. مشخصات مورد نیاز برای ترسیم روتور نیز در شکل نشان داده شده است.



با توجه به آنکه تعداد قطعههای روتور در این موتور برابر با ۱۴ می باشد برای به دست آوردن همهٔ آنها از دستور Linear Pattern استفاده شده است. پس از کامل شدن ترسیم روتورها، باید کویل ها را در میان ماژول های باریک و پهن استاتور رسم کرد. پس از کامل شدن ترسیم روتورها، باید کویل ها را در میان ماژول های باریک و پهن استاتور که از ترکیب شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) به دست آمده است، رسم کرد.



در نهایت با ترسیم هر سه بخش استاتور، روتور و کویل می توان شکل موتور را به دست آورد که در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

شکل (۱۲): نمای دوبعدی از موتور اصلاح شده به صورت خطی

پس از شبیهسازی کامل موتور، حال نوبت آن است که تنظیمات مربوط به شبیهسازی را به نرم افزار داد. پس از آنکه تنظیمات مربوط به هریک از قسمتها از جمله سرعت، جریان، تعداد دور کویل ها و... وارد شدند، می توان موتور را در دو حالت استاتیک و دینامیک مورد تحلیل قرار داد. برای این کار ابتدا شبیهسازی استاتیک صورت گرفته است.

۲.۳. شبیهسازی به روش المان محدود در حالت استاتیک

در این شبیهسازی ابتدا یکی از فازهای موتور جریان خواهد داشت و تحلیلها و نمودارهای مربوط بر اساس آن صورت خواهد گرفت.



شکل (۱۳): توزیع چگالی شار موتور

با توجه به شکل (۱۳) و (۱۴) فاز تحریکشدهٔ A دارای شار مغناطیسی در مسیر همراستایی برای به حرکت درآوردن روتور است. با افزایش میزان همپوشانی روتور و دندانه های استاتور چگالی شار بیشتری از مسیر تعیین شده بیشتر خواهد شد؛ به طوری که در دندانه های استاتور فاز A دامنهٔ چگالی شار به میزان ۱/۴۷۴ تسلا می باشد و در فازهای دیگر B و C در حدود ۰/۰۸۷ تسلا می باشد که این اختلاف چگالی شار بین فازهای همراستا و ناهمراستا قدرت عامل برای ایجاد گشتاور را نتیجه می دهد.



همان طور که در شکل (۱۴) مشخص است، مشهای استاتور به نسبت روتور بزرگترند. مشربندی در نزدیکی فاصلهٔ هوایی بسیار ریز انتخاب شدهاند تا تحلیل دقیقتری صورت بگیرد. برای آنکه بتوان موتور را شبیهسازی نمود نیاز است که قسمتهای مختلف موتور مشربندی شوند تا تحلیل استاتیک آن بهدرستی صورت بگیرد. مقدار خطوط شار

که در فاز A از طریق رنگهای زرد و سبز جریان دارنـد، نیـز در زیـر مشخص شده است. مقدار مینیمم وماکزیمم در شکل (۱۵) با توجـه بـه میزان حرارت مشخصشده در شکل تعیین شده است.





شکل (۱۶): توزیع چگالی و مسیر

شکل (۱۵) نحوهٔ توزیع چگالی شار از طریق مسیرهای مشخص را که در شکل (۱۴) مشخص شده نشان می دهد. نحوهٔ توزیع چگالی شار در این شکل ها بدین صورت است که هر چقدر فاصلهٔ لبهٔ روتور از لبهٔ استاتور بیشتر باشد، چگالی شار افزایش می یابد. یکی از خروجی های اصلی لازم برای موتور اصلاح شده، گشتاور تولیدی موتور است. با توجه املی لازم برای موتور اصلاح شده، گشتاور تولیدی موتور است. با توجه به اینکه موتور شبیه سازی شده قادر به ارائهٔ گشتاور به صورت مستقیم نیست، ابتدا مقدار نیروی آن در راستای محور X به دست آمده، سپس در مقدار شعاع میانگین ضرب شده است که به این ترتیب می توان مقدار گشتاور را به دست آورد (شکل ۱۵).



۲۲ نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی

انجام شده است. همان طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است، یک اعوجاج نامطلوب بزرگ در دورهٔ گذرا ۰= t تا ۲۰۰۳ = t ثانیه در گشتاور خروجی رخ میدهد و پس از یک دورهٔ کوتاه گذرا، مقدار مرجع را دنبال میکند.

۳.۳. شبیهسازی به روش المان محدود در حالت دینامیکی

برخلاف شبیهسازی استاتیکی، در حالت دینامیکی نیاز است که همهٔ کویل های مربوط به هر سه فاز تحریک شوند تا شبیهسازی مناسبتری حاصل شود. مراحل شبیهسازی دینامیکی همانند شبیهسازی استاتیکی است با این تفاوت که مدار الکتریکی این دو با یکدیگر متفاوت است.



همان گونه که در شکل (۱۸) مشاهده می شود، در هر لحظه دو فاز تحریک شده و خطوط شار آنها در شکل (۱۹) مشخص است که با حرکت روتور در طول محور X این فازها هر لحظه دچار تغییر خواهند شد. شار مغناطیسی هر سه فاز با توجه به تعداد کویلها و تعداد دور هریک از آنها در شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شار مغناطیسی مربوط به هر سه فاز در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بهدلیل تغییرات گام در مقدار مرجع گشتاور موتور، دو اغتشاش اصلی در ۲۵/۰۰=t ثانیه و ۲۵/۰۰=t ثانیه وجود دارد.



بر اساس شکل (۲۰)، موتور اصلاح شدهٔ پیشـنهادی کـاهش قابـل توجهی در موج شار استاتور را نشان مـیدهـد. حـداکثر مقـدار ریپـل گشتاور موج شار استاتور کمتر از ۲۰/۵ و بر اساس بانـد هیسـترزیس مشخص شده است. از آنجایی که جریـان شـار اسـتاتور یـک پـارامتر الکتریکی است، کاهش موج آن به این معنی است که هارمونیکهای فرکانس بالا جریان ورودی موتور کاهش مییابد.



همان طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، موتور پیشنهادی می تواند مرجع شار را در کمتر از ۲۰،۴۵ دنبال کند. جدول (۶) عملکرد موتورهای شبیه سازی شده را نشان می دهد. در حالی که موتور پیشنهاد شده و اصلاح شده درصد کمتری از جرم مواد فعال استفاده می کند، این موتورها از لحاظ تولید گشتاور و نقاط کارایی عملکرد تقریباً یکسان دارند. شایان ذکر است که نقطهٔ عملکرد انتخاب شده لزوماً نقطهای نیست که موتورها در حداکثر کارایی عمل کنند.

جدول (۶): مقايسة عملكرد موتورها				
موتور پیشنهادی اصلاحشدہ	مو تور پیشنهادشده	موتور STW	پارامترها	
۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶	سرعت (rpm)	
۲۹/۱	۲۸/۳	۲۸/۹	گشتاور (Nm)	
۵/۲۲	۶/۶۳	۶٩	تلفات آهن استاتور (w)	
۲/۱۶	۲/۱۶	14/0	تلفات آهن روتور (w)	
۶.	۴٩/٨	ν٣/۵	مجموع تلفات آهن (W)	
r. v	310	۳.٧	تلفات مس (w)	
366	390	۳۸۰/۵	مجموع تلفات (W)	
۸۲/۹	۸۲/۶	۳/۲۸	راندمان (%)	

نتایج دوبعدی و سهبعدی صورت پذیرفته است. سپس موتور پیشنهادی با افزایش تعداد بخش های روتور و تغییر شکل استاتور اصلاح شده است. موتور پیشنهادی و موتور پیشنهادی اصلاح شده از جرم مواد اکتیو کمتر استفاده می کنند. موتور پیشنهادی اصلاح شده گشتاور بسیار بالا در هر نرخ جرم مادهٔ اکتیو را نشان می دهد (۳/۵۵ Nm/kg). موتور پیشنهادی چگالی بیشتری نسبت به موتور معمول (STW) دارد. ساختار پیشنهادی دارای پتانسیل بالایی برای وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EVs) و وسایل نقلیهٔ الکتریکی هیبریدی (HEVs) است.

- Ling, X., Li, B., and et. al., "Simulation of Switched Reluctance Motor Drive System Based on Multi-Physics Modeling Method", in IEEE Access, Vol. 5, pp. 26184-26189, 2017.
- [2] Santos, F., Anthonis, J., Naclerio, F., "Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 1, pp. 469-476, 2014.
- [3] Hu, Y., Gan, C., H. Wen, "Modular Tri-Port High-Power Converter for SRM Based Plug-in Hybrid Electrical Trucks", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 4, pp. 3247-3257, 2018.
- [4] Sun, Q., Wu, J., Guo, J., "A New Phase Current Reconstruction Scheme for Four-Phase SRM Drives Using Improved Converter Topology without Voltage Penalty", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 1, pp. 133-144, 2018.
- [5] Ye, J., Malysz P., Emadi, A., "A Fixed-Switching-Frequency Integral Sliding Mode Current Controller for Switched Reluctance Motor Drives", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 2, pp. 381-394, 2015.
- [6] Li, X., Shamsi, P., "Inductance Surface Learning for Model Predictive Current Control of Switched Reluctance Motors", in IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 1, No. 3, pp. 287-297, 2015.
- [۷] فرهادی قریبه، حامد، صادقی یزدانخواه، احمد، عزیزیان، محمدرضا،

«بهبود بازده انرژی و ارزیابی اقتصادی موتورسیکلت الکتریکی با حضور

مدیریت انرژی، دورهٔ ۳، شمارهٔ ۴، صفحهٔ ۲۴_۳۷، ۱۳۹۲.

- [8] Xue, D., Cheng, K., Bao, Y., Cheung, N., "Switched Reluctance Generators with Hybrid Magnetic Paths for Wind Power Generation", in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 11, pp. 3863-3866, 2012.
- [9] Mecrow, B., El-Kharashi, E., Jack, A., "Preliminary Performance Evaluation of Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors", in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 679-686, 2004.
- [10] Y. Pang, Y., and et. al., "Eddy Current Loss in the Frame of a Flux-Switching Permanent Magnet Machine", in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, pp. 3413-3415, 2006.
- [11] Yang, Z., Shang, F., Brown, I., Krishnamurthy, M., "Comparative Study of Interior Permanent Magnet,

جدول (۷): پارامترهای طراحی ماشین		
مقدار	نماد	پارامترها
17/14	N_s/N_r	ماژول استاتور / بخش روتور
08.	V	ولتاژ منبع تغذیه (V)
١.	I _{ph,m}	حداکثر جریان فاز، A
۴	P _n	توان (KW)
15	w	سرعت پایه (rpm)

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، موتور شارمحور سوئیچ رلوکتانسی با استاتور مـدولار بـا چگالی گشتاور بالا ارائه شده است. تحلیل استاتیک موتور با استفاده از

مراجع

Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications", in IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 1, No. 3, pp. 245-254, 2015.

- [12] Dorrell, D., and et. al., "Comparison of Different Motor Design Drives for Hybrid Electric Vehicles", in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Vol. 11, No. 4, pp. 3352–3359, 2010.
- [13] Desai, P. C., and et. al., "Novel Switched Reluctance Machine Configuration with Higher Number of Rotor Poles than Stator Poles: Concept to Implementation", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, pp. 649-659, 2010.
- [14] Neudorfer, H., Wicker, N., Binder, A., "Comparison of Three Different Electric Powertrains for the Use in Hybrid Electric Vehicles", in 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Vol. 95, No. 4, pp. 510–514, 2008.
- [15] Ye, J., Malysz, P., Emadi, A., "A Fixed-Switching-Frequency Integral Sliding Mode Current Controller for Switched Reluctance Motor Drives", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 2, pp. 381-394, 2015.
- [16] Madhavan, R., Fernandes, B., "Axial Flux Segmented SRM with a Higher Number of Rotor Segments for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, No. 1, pp. 203-213, 2013.
- [17] Madhavan, R., Fernandes, B., "A novel axial flux segmented SRM for electric vehicle application", The XIX International Conference on Electrical Machines -ICEM 2010, Rome, pp. 1-6.
- [18] Peng, F., Ye, J., Emadi, A., Huang, Y., "Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Drives Based on Numerical Method", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 3, pp. 2159-2168, 2017.
- [19] Widmer, J. D., Mecrow, B. C., "Optimized Segmental Rotor Switched Reluctance Machines with a Greater Number of Rotor Segments Than Stator Slots", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, pp. 1491-1498, 2013.
- [20] Loureiro, L., Filho, A., Zabadal, J., Homrich, R., "A Model of a Permanent Magnet Axial-Flux Machine Based on Lie's Symmetries", in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 4321-4324, 2008.